الفصل الثاني : دور العضلة الهيكلية المخططة في تحويل الطاقة

Le rôle du muscle strié squelettique dans la conversion d'énergie

يمكن كل من التنفس والتخمر من هدم المواد العضوية المستهلكة، وتحرير الطاقة الكامنة فيها، لتصبح على شكل ATP قابل للإستعمال في مختلف الظواهر المستهلكة للطاقة، كالتفاعلات الكيميائية، مواجهة تغيرات درجة الحرارة، أو القيام بالحركة؛ يعتبر التقلص العضلي إذن من الظواهر المستهلكة للطاقة.

تساؤلات:

- كيف يتم تحويل الطاقة الكمياائية (ATP) إلى طاقة ميكانيكية (حركة) من طرف العضلة؟
- ما هي البنيات المميزة للعضلة والتي تتيح عملية التحويل هذه؟
- كيف يتم التقلص العضلي؟
- كيف تجدد العضلة مخزونها من L'ATP؟

I) النشاط الميكانيكي للعضلة الهيكلية المخططة

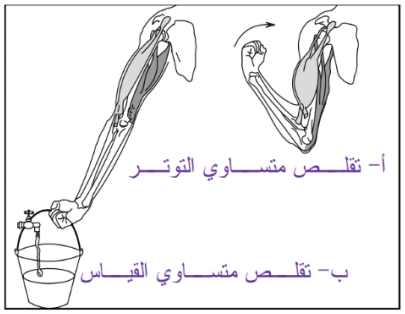
1) أنواع التقلصات العضلية

العضلة الهيكلية المخططة هي كل العاضلات المرتبطة بالهيكل العضمي مثل عضلة اليد والساق والتي تمكن من القيام بالحركة عن طريق التقلص والتمدد وتتميز بخاصيات الإهتياجية (Excitabilité) والقلوصية (Contractilité) والمرونة (Elasticité)

النشاط المنجز	القوة المبذولة من طرف العضلة = التوتر F	طول العضلة L_i	الشغل المبذول $T=\Delta L*F$	نوع التقلص
ثني الساعد أثناء حمل الأثقال	ثابتة	ينقص	T>0	تقلص متساوي التوتر
حمل دلو يمتلئ تدريجيا بالماء	متزايدة	ثابتة	T=0	تقلص متساوي القياس

مع $\Delta L=L_i-L_f$ Li: طول العضلة قبل التقلص L_f: طول العضلة بعد التقلص

Stecholia.com

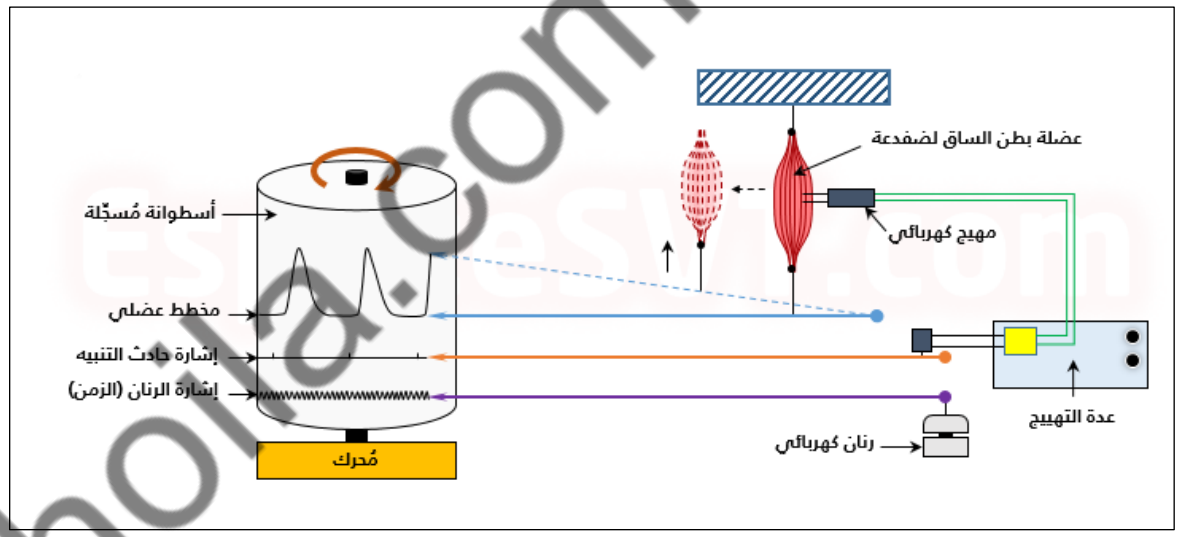


يمكن ان نميز بين نوعين من التقلصات:

- تقلص متساوي القياس: حيث طول العضلة لا يتغير بينما تزداد القوة العضلية.

- تقلص متساوي التوتر: حيث ينقص طول العضلة بينما القوة العضلية لا تتغير

2) العدة التجريبية لتسجيل التقلصات العضلية عند ضفدعة



نوصل عضلة بطن الساق لضفدعة مخربة النخاع الشوكي والدماغ بجهاز تسجيل التقلص العضلي والذي يسمى راسمة عضلية Myographe، إما مباشرة يتم التهيج أو عن طريق تهيج العصب الوركي فنحصل على تسجيلات للتقلص العضلي Myogrammes بواسطة أسطوانة تدور بسرعة ثابتة.

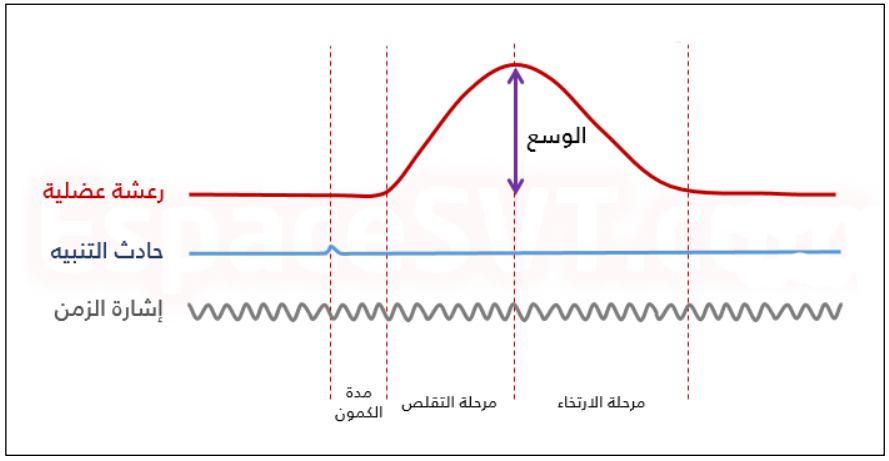
3) تحليل التسجيلات العضلية

أ- استجابة العضلة لإهاجة واحدة فعالة

بعد تهيج العضلة بإهاجة واحدة فعالة نحصل على تسجيل عضلي يسمى رعشة عضلية (Secousse musculaire)، يمكن تقسيم هذا التسجيل إلى ثلاث مراحل:

- مرحلة الكمون: وهو الزمن الفاصل بين حادث التنبيه وأستجابة العضلة للتهيج.

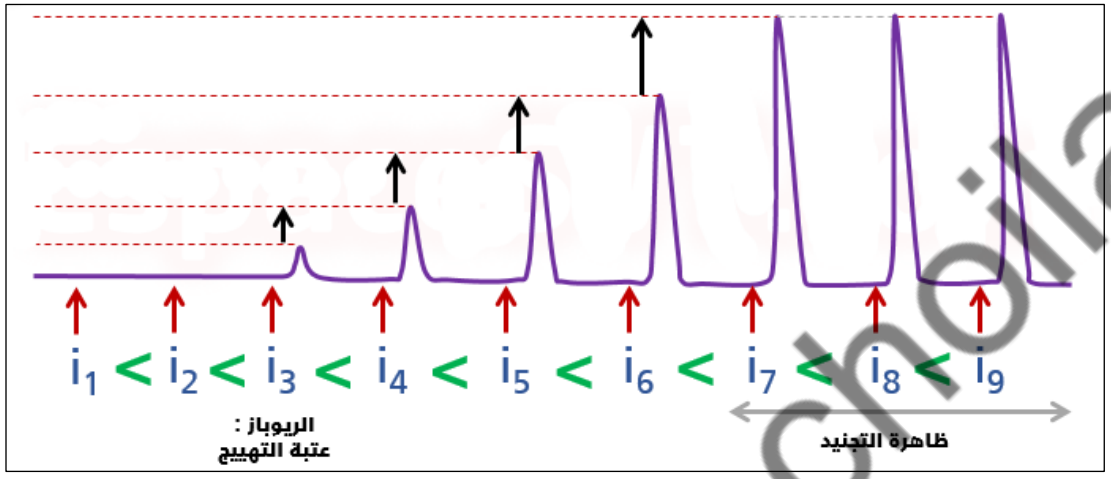
Stecholia.com



- مرحلة التقلص: وهي الفترة التي خلالها تتقلص العضلة (ارتفاع وسع الرعشة العضلية).

- مرحلة الإرتخاء: وخلالها تعود العضلة إلى طولها الأصلي (إنخفاض وسع الرعشة العضلية).

ب- إستجابة العضلة لإهاجات متباعدة ذات شدة متصاعدة



- بعد التهيجين i_1 و i_2 لا نحصل على أي إستجابة عضلية في هذه الحالة نقول أن الشدة غير فعالة.

- عند التهيج بشدة i_3 تحدث أول إستجابة تسمى عتبة التهيج أو الريوباز وهي أقل شدة إهاجة تسبب حوث تقلص عضلي.

- إنطلاقا من الشدة i_3 كلما ازدادة شدة التهيج ازداد وسع التقلص.

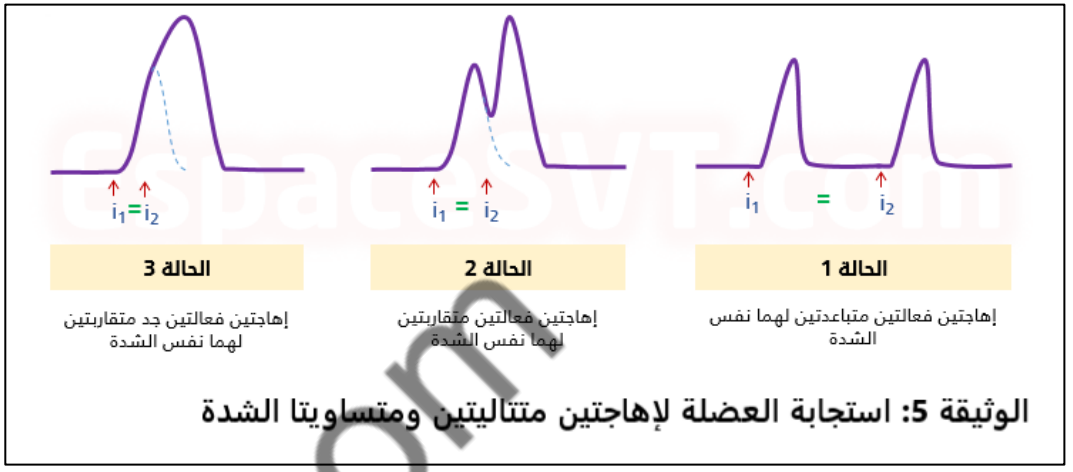
- ابتداءا من الشدة i_7 يبقى وسع التقلصات ثابت في قيمة قصوى مهما ارتفعة شدة الإهاجة وهذا يفسر بكون العضلة تتكون من عدة ألياف عضلية كلما ازدادة شدة الإهاجة يزداد عدد الألياف المستجيبة وعندما تستجيب كل الألياف يبقى الوسع ثابت في قيمة قصوى وهو مايعرف بقانون التجنيد أو الإجمال او التعبئة بحيث تضاف استجابة الألياف لبعضها البعض.

ج- إستجابة العضلة لإهاجتين فعالتين متتاليتين ومتساويتا الشدة.

يخضع العصب الوركي المرتبط بعضلة بطن الساق لتهيج أول ثم تهيج ثاني بنفس الشدة مع تغيير المدة الزمنية الفاصلة بين التهيجين فنحصل على التسجيلات التالية:

- الحالة 1: عند تطبيق التهيج الثاني بعد انتهاء الإستجابة للتهيج الأول نحصل على رعشة عضلية معزولة بنفس الوسع.

Stechnola.com

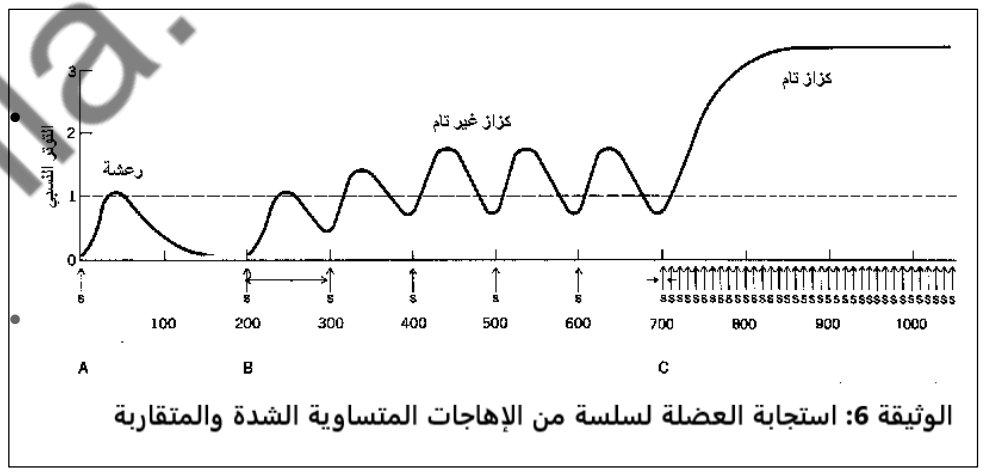


الوثيقة 5: استجابة العضلة لإهاجتين متتاليتين ومتساويتا الشدة

- الحالة 2: عند تطبيق التهيج الثاني خلال مرحلة الإرتخاء للإستجابة الأولى تلتحم الإستجابتين بشكل غير تام ويكون وسع الإستجابة الثانية أكبر.

- الحالة 3: عند تطبيق التهيج الثاني خلال مرحلة التقلص للإستجابة الأولى نحصل على استجابة واحدة ذات وسع أكبر نتيجة الإلتحام التام للإستجابتين.

د- إستجابة العضلة لعدة اهاجات فعالة لها نفس الشدة ومتقاربة



الوثيقة 6: استجابة العضلة لسلسة من الإهاجات المتساوية الشدة والمتقاربة

حسب المدة الفاصلة بين الإهاجتين، نميز الحالتين التاليتين:

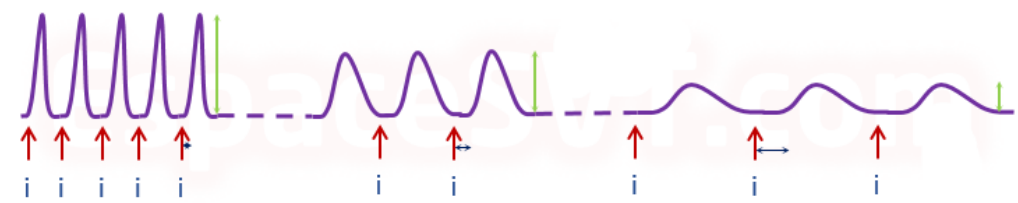
- الحالة 1 : عندما يكون تردد الإهاجات ضعيفا (تطبق خلال فترة إرتخاء الإستجابة السابقة فتلتحم الإستجابات بشكل غير تام)، نحصل على تسجيل عضلي مُتموج، نسمي التقلص العضلي في هذه الحالة بالكزاز الغير تام أو الناقص.
- الحالة 2 : عندما يكون تردد الإهاجات مرتفعا(تطبق الإهاجة الثانية خلال فترة التقلص للإستجابة السابقة فتلتحم الإستجابات بشكل تام)، نحصل على تسجيل عضلي يبقى مستقيما، نسمي التقلص العضلي في هذه الحالة بالكزاز التام.

ملحوظة:

في الجسم تكون العضلات في حالة كزاز تام لأن الجهاز العصبي يرسل سيالات عصبية متواصلة وجد متقاربة.

ه- التعب العضلي (إهاجات متتالية ومتساوية الشدة لمدة طويلة)

Stechnola.com



الوثيقة 7: التعب العضلي (استجابة العضلة لإهاجات متتالية ومتساوية الشدة لمدة طويلة)

بعد تعريض العضلة لسلسلة إهاجات متتالية و لمدة طويلة، يُلاحظ تعرضها للعياء العضلي أو التعب العضلي والذي يتجلى في:

- ازدياد مدة الكمون الفاصلة بين الإهاجة و استجابة العضلة.
- ازدياد مدة الرعشات العضلية (مرحلتي التقلص و الارتخاء).
- نقصان وُسع الرعشات العضلية.

II) الظواهر المرافقة للتقلص العضلي

خلال مجهود عضلي يلاحظ إضافة إلى تقلص العضلة (ظواهر ميكانيكية) الظواهر التالية:

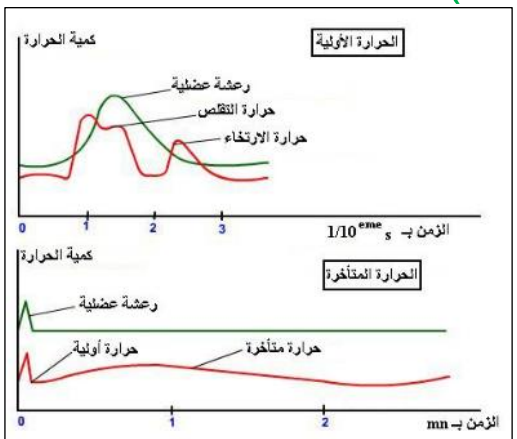
- ارتفاع درجة حرارة الجسم
- ارتفاع كمية O_2 المستهلك وCO_2 المطروح (ارتفاع التردد التنفسي)
- ارتفاع تردد القلب والتردد الدموي

إذن التقلص العضلي في جوانبه الميكانيكية يكون مصحوب بظواهر أخرى حرارية وكيميائية (طاقية)

1) الظواهر الحرارية

تطرح الحرارة من طرف العضلة في مرحلتين أساسيتين:

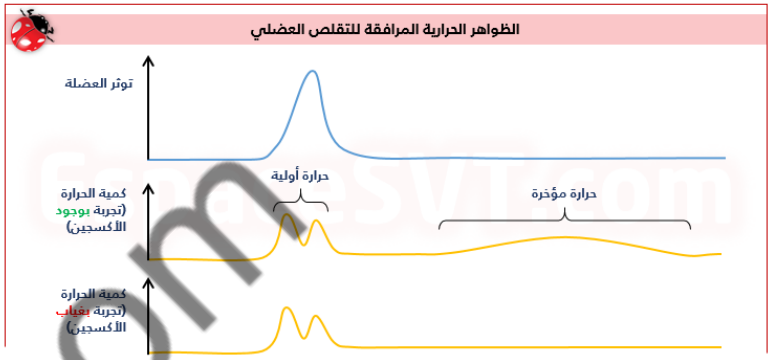
- المرحلة الأولى: تحرر خلال الرعشة العضلية وتسمى الحرارة الأولية وتستغرق مدة وجيزة ويحرر جزء منها خلال مرحلة التقلص والجزء الأخر خلال مرحلة الإرتخاء.
- المرحلة الثانية: تحرر بعد الرعشة العضلية وتسمى الحرارة المتأخرة وهي ذات شدة أضعف وتستغرق مدة أطول.



الوثيقة 8: الظواهر الحرارية المصاحبة للتقلص العضلي

Stecholia.com

قصد التعرف على أسباب هذه التفرقة (حرارة أولية/حرارة متأخرة) نقترح الوثيقة اسفله



الوثيقة 8: تابع

⇦ بغياب الأكسجين، نلاحظ طرح الحرارة الأولية فقط، مما يدل على أنها مرتبطة بتفاعلات حي لاهوائية (التخمر)، بينما غياب الحرارة المتأخرة في هذه الحالة يدل على أنها ناتجة عن تفاعلات حي هوائية تتطلب وجود الأكسجين (التنفس).

2) الظواهر الطاقية (الكيميائية)

خلال النشاط العضلي يلاحظ ارتفاع في حجم O_2 المستهلك وCO_2 المطروح وارتفاع في كيمية الكليكوز المستهلك بينما تبقى نسبة البروتيدات والدهون ثابتة.

⇦ تستمد العضلة الطاقة الضرورية لتقلصها من أكسدة الكليكوز.

	خلال ساعة بالنسبة ل 1Kg من العضلة	
	في حالة راحة	في حالة نشاط
حجم الدم الذي يعبر العضلة ب (l)	12.220	56.325
حجم الأكسجين المستهلك ب (l)	0.307	5.207
حجم ثاني أكسيد الكربون المطروح ب (l)	0.220	5.950
كمية الكليكوز المستهلكة ب (g)	2.042	8.432
البروتيدات المستهلكة ب (g)	0	0
الدهون المستهلكة ب (g)	0	0

الوثيقة 9: مقارنة الظواهر لبطاقية لعضلة في حالة راحة ونشاط

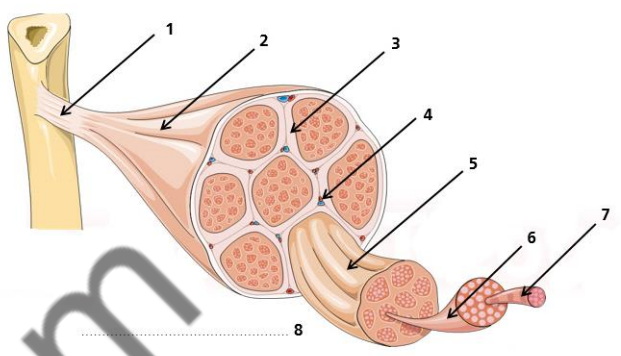
III) بنية وفوق بنية العضلة الهيكلية المخططة

1) بنية العضلة الهيكلية المخططة والخلية العضلية

- تتكون العضلة الهيكلية المخططة من عدة ألياف عضلية متجمعة على شكل حزمة يحيط بيها نسيج ضام

Stecholla.com

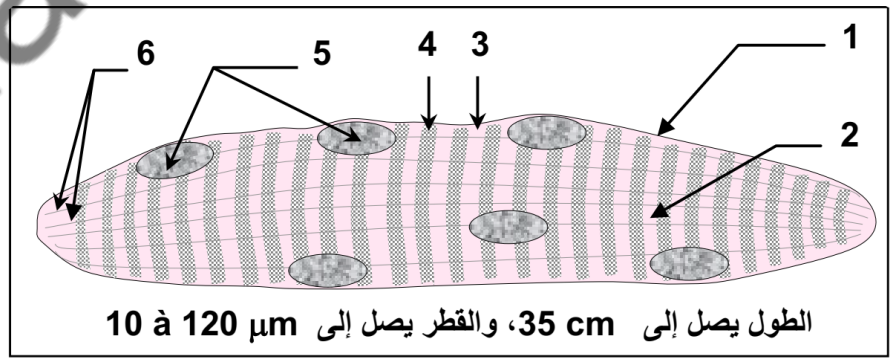
- الألياف العضلية هي عبارة عن خلايا ضخمة متعددة النوى وتحتوي على ساركوبلازم يوجد به العديد من الميتوكندريات وشبكة سركوبلازمية كثيفة غنية ب ca^{2+} (الكالسيوم) كما يحتوي على كمية من الكليكوجين وخضاب دموي ويبقى المكون الرئيسي لليف العضلي الليفات العضلية، التي تمنح المظهر المخطط للعضلة.



الوثيقة 10:رسم تخطيطي لبنية العضلة الهيكلية المخططة

1. وتر، 2. عضلة، 3. نسيج ضام، 4. أوعية دموية، 5. حزمة من الألياف العضلية، 6. ليف عضلي، 7. ليف عضلي أو خيط عضلي، 8. بنية العضلة الهيكلية المخططة

الوثيقة 10: (تابع): رسم تفسيري لليف العضلي = الخلية العضلية

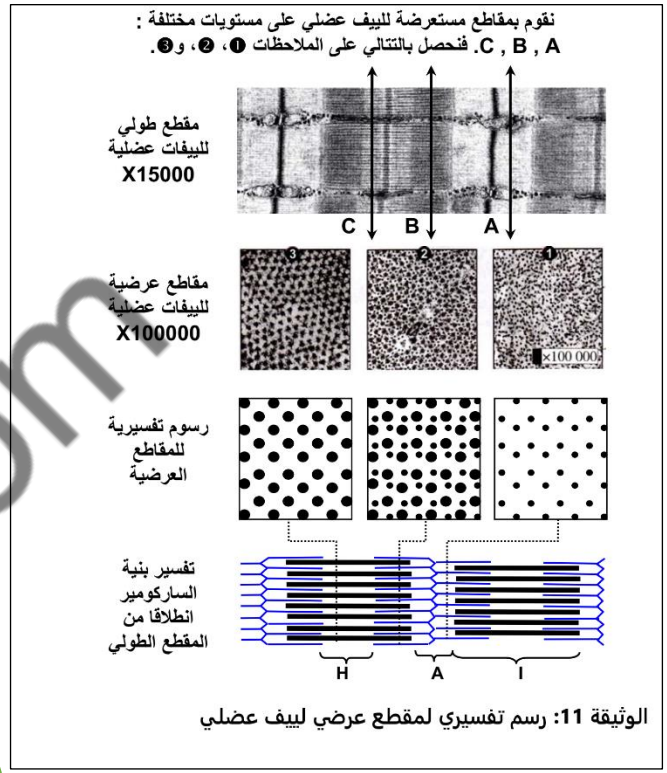


1. غشاء سركوبلازمي (سركوليم)، 2. سركوبلازم، 3. شريط فاتح، 4. شريط داكن، 5. نواة، 6. ليفات عضلية،

2) فوق بنية الليف العضلي

يتكون الليف العضلي من تناوب أشرطة فاتحة **I** (Isotropique=I) وأشرطة داكنة **A** (Anisotropique=A).

Stechoila.com



الوثيقة 11: رسم تفسيري لمقطع عرضي لليف عضلي

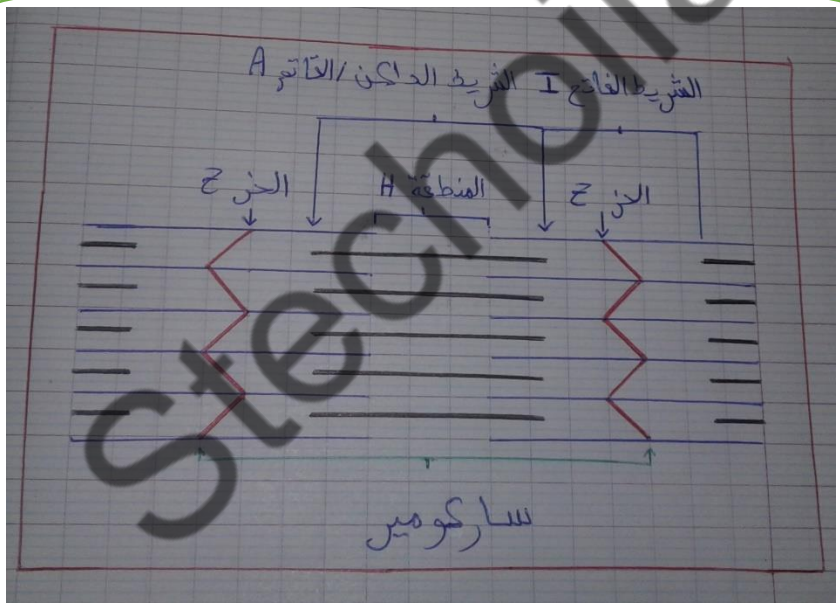
يظهر وسط كل شريط داكن منطقة فاتحة تسمى **المنطقة H** (de l'allemand heller, plus pâle)، يظهر وسط كل شريط فاتح خط قاتم يسمى **الحز Z**.

تسمى المنطقة المحصورة بين الحزين **Z** متتاليين **سركومير** وهو يشكل الوحدة البنيوية والوظيفية لليف العضلي.

يتكون كل ليف عضلي من صنفين من الخيوطات العضلية:

- **خيوطات سميكة:** مكونة من بروتين يدعى ميوزين Myosine
- **خيوطات دقيقة:** مكونة من بروتين يدعى الأكتين Actine

الشريط الفاتح مكون فقط من خيوطات الأكتين أم الشريط القاتم فيتكون من خيوطات الأكتين والميوزين بإستثناء المنطقة **H** حيث تتواجد فقط خيوطات الميوزين (وتكون أكثر سمكا).



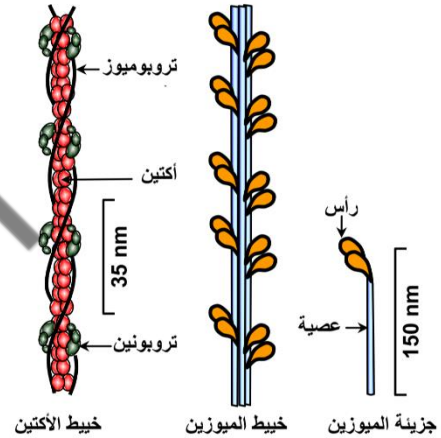
رسم تفسيري لبنية السركومير

Stechnila.com

3) بنية الخييطات العضلية Les myofilaments

- يتكون خييط الأكتن من 100 جزيئات الأكتين على شكل سلسلتين ملتويتين وتربط بينهما بروتينات أخرى تدعى تروبونين والتروبوميوزين.

- يتكون خييط الميوزين من 100 جزيئات الميوزين وتتكون كل جزيئة من ساق ورأسين كرويين يتميزان بنشاط أنزيمي قوي ATPase حيث تلتحم السيقان بينما تبقى الرؤس بارزة في الجوانب.



الوثيقة 12: بنية خييطات الأكتن والميوزين

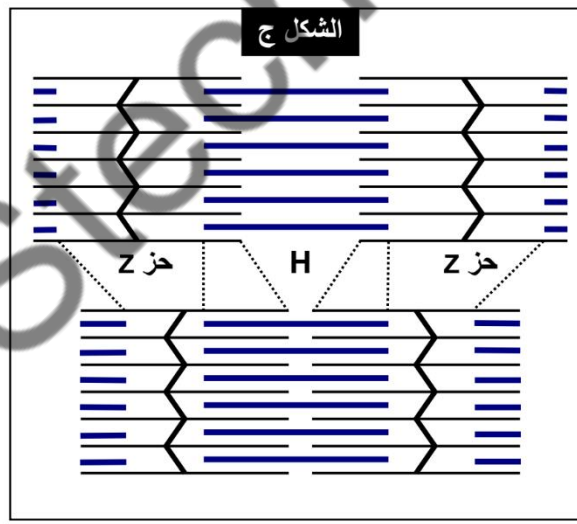
IV) أليات التقلص العضلي

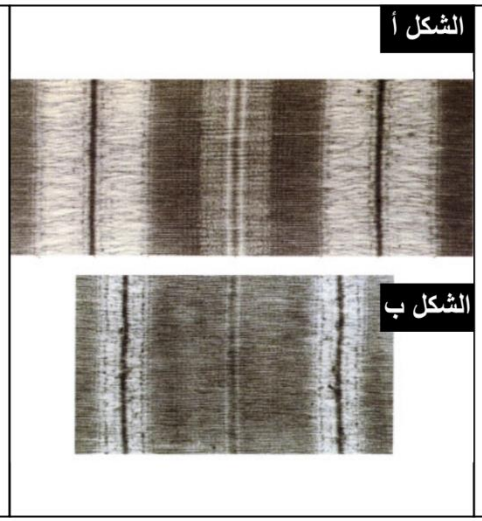
1) ملاحظة سركومير في حالة التقلص والإرتخاء

خلال التقلص العضلي نلاحظ:

- إقتراب الحزيين Z فيما بينهم.
- تقصير طول السركومير وإختزال طول الأشرطة الفاتحة **I**.
- استقرار طول الأشرطة القاتمة **A**.
- نقصان طول المنطقة **H**.

تعطي الوثيقة أمامه ملاحظة مجهرية لساركومير مرتخ (شكل أ) وآخر متقلص (شكل ب)، مصحوبة برسم تفسيري (شكل ج).
قارن الشكلين أ وب واستخرج مختلف التغيرات التي تطرأ على الليف خلال التقلص العضلي، ثم فسر هذه التغيرات.





الوثيقة 13: ملاحظة ورسم تفسيري لسركومير في حالة الإرتخاء والتقلص

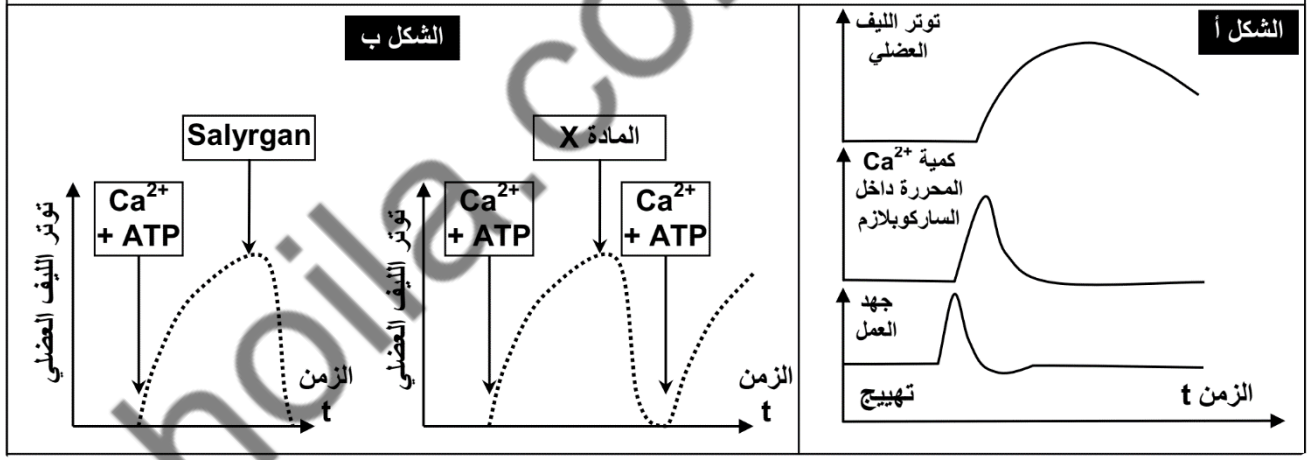
Stechoila.com

بمأن طول الأشرطة القاتمة يبقى مستقر؛ فليس هناك تقصير للخييطات بل إنزلاق فيما بينها Glissement des filaments.

2) آلية إنزلاق الخييطات

أ. معطيات تجريبية

يعطي مبيان الشكل أ، نتائج قياس كل من كمية Ca^{2+} داخل ساركوبلازم الخلية العضلية وتوترها بعد تهييجها.
يعطي مبيان الشكل ب، نتائج تأثير وجود أو عدم وجود ATP و Ca^{2+} ، على توتر الليف العضلي.
(المادة X هي مادة كيميائية ترتبط بالكالسيوم وتمنع فعله. المادة Salyrgan، هي مادة كابحة لحلمأة ATP).
حلل هذه المنحنيات، واستنتج دور ATP وايونات الكالسيوم في حدوث التقلص العضلي.



الوثيقة 14: دور كل من +Ca2 وATP في حدوث التقلص العضلي

- الشكل أ: بعد تهيج العضلة مباشرة نلاحظ ارتفاع تركيز Ca^{2+} داخل سركوبلازم الخلية العضلية متبوع بإرتفاع توتر الليف العضلي (تقلص).

- الشكل ب: نلاحظ أن الليفات العضلية تتقلص بسرعة عند وجود Ca^{2+} وATP وعندما نمنع حلمأة ATP بفعل مادة Salyrgan أو عندما نمنع فعل Ca^{2+} بإضافة المادة X يختفي توتر الليف العضلي.

⇦ نستنتج من هذه المعطيات أن التقلص العضلي يستلزم وجود ال ATP و Ca^{2+}.

* يبين الجدول التالي نتائج تجارب أنجزة على خييطات عضلية.

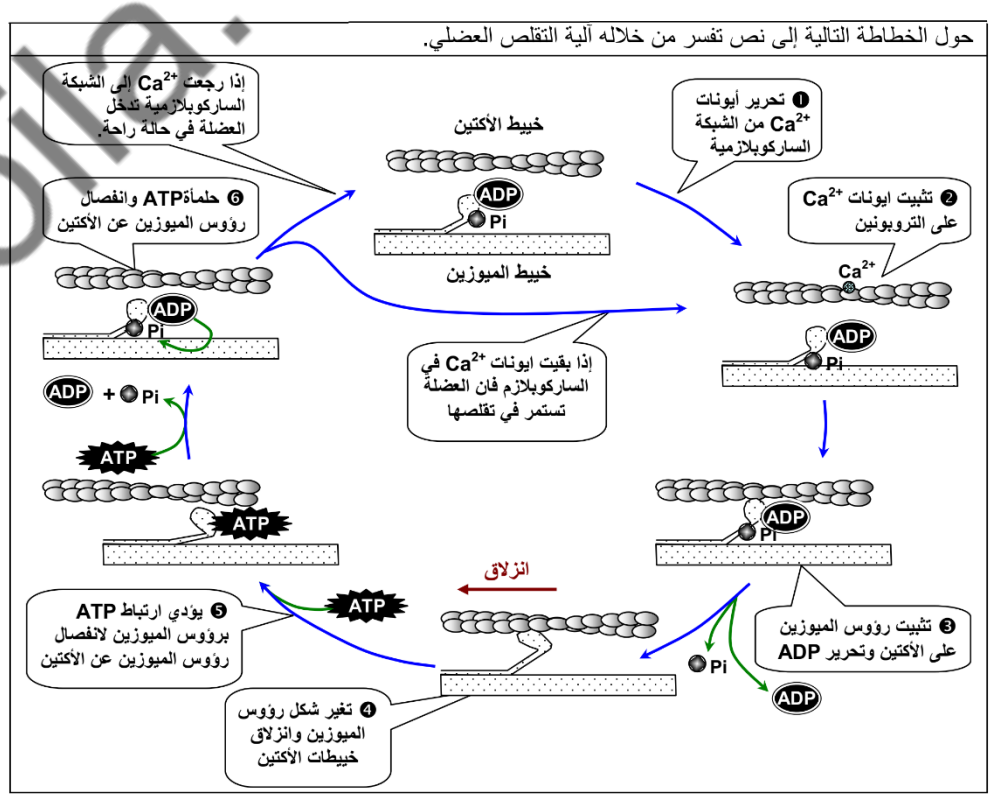
Stechnila.com

تجارب	النتائج	إستنتاجات
أكتين (خيبطات الأكتين فقط) + الميوزين + ATP	تكون مركب الأكتوميوزين الذي يستمر ملتصقا حتى نفاذ ATP	يلعب مركب الأكتوميوزين دور أنزيم ATPase الذي يؤدي الى حلمأة ATP وتحرير الطاقة لنزلاق الخييطلات فيما بينها (التقلص)
أكتين + ميوزين + تربونين + التروبوميوزين + ATP	عدم تكون مركب الأكتوميوزين	يمنع كل من تروبونين والتربوميوزين ارتباط رؤوس اليوزين بلأكتين وتكون الأكتوميوزين
نفس المواد المستعملة في التجربة 2 + Ca^{2+}	تكون مركب الأكتوميوزين مع التقلص	تعمل Ca^{2+} على تحرير مواقع ارتباط أكتين واليوزين فيتكون مركب الأكتوميوزين وتنزلق الخييطات فيما بينها.

ب. مراحل التقلص العضلي

يتم التقلص العضلي عبر مراحل:

- **طور الراحة:** خييطات الأكتين وخييطات الميوزين منفصلة عن بعضها البعض وكل رأس ميوزين يثبت جزيئة ATP.
- **طور الإرتباط:** . وصول السيالة العصبية لشبكة السركوبلازمية
  . تحرير أيونات Ca^{2+}
  . تثبيت أيونات Ca^{2+} على التروبونين
  . تحرير مواقع ارتباط الأكتين بالميوزين
  . ارتباط رؤوس الميوزين بالأكتين وتكون مركب الأكتوميوزين Complexe actomyosine
- **طور الدوران:** . تكون مركبات الأكتوميوزين يحفز حلمأة ATP.
  . تحرير طاقة تأدي الى دوران رؤوس الميوزين وبالتالي إنزلاق



الوثيقة 15: أهم مراحل التقلص العضلي

Stechoila.com

خيبطات الأكتين نحو مركز السركومير.

- **طور الإرتخاء:** . توقف التنبيه يؤدي الى ضخ أيونات Ca^{2+} الى الشبكة السركوبلازمية.

. تثبيت جزيئة ATP جديدة على رؤوس الميوزين.

. انفصال رؤوس الميوزين عن الأكتين فيحدث الإرتخاء.

خلاصة

العضلة تحول الطاقة الناتجة عن حلمأة ATP (طاقة كميائية) الى إنزلاق خيبطات الأكتين بالنسبة لخيبطات الميوزين (طاقة ميكانيكية) مع تحرير جزء من هذه الطاقة على شكل حرارة (طاقة حرارية).

إذن فالعضلة تحول الطاقة من الحالة الكميائية الى الحالة الميكانيكية والحرارية.

V) طرق تجديد الطاقة اللازمة للتقلص العضلي

1) معطيات تجريبية

يمثل الجدول التالي نتائج معايرة مواد أثناء ضروف تجريبية متخلفة.

التجارب	الملاحظات	المواد المعايرة	نتائج المعايرة	
			قبل التقلص	بعد التقلص
اهاجة العضلة كهربائيا	تقلص العضلة لمدة 3 دقائق	غليكوجين	1.62	1.21
		حمض لبني	1.5	1.95
		ATP	2	2
		فوسفوكرياتين	1.5	1.5
اهاجة العضلة بوجود الحمض الأيودي الأسيتيك (مادة توقف انحلال الكليكوز)	تقلص العضلة في نفس ظروف التجربة السابقة	غليكوجين	1.62	1.62
		حمض لبني	1.5	1.5
		ATP	2	2
		فوسفوكرياتين	1.5	0.4
اهاجة العضلة بوجود الحمض الايودي الأسيتيك ومادة مانعة للفوسفوكرياتين كيناز (أنزيم ضروري لانحلال الفوسفوكرياتين)	العضلة تتقلص بصفة عادية ثم تتوقف	غليكوجين	1.62	1.62
		حمض لبني	1.5	1.5
		ATP	2	0
		فوسفوكرياتين	1.5	1.5

الوثيقة 16: تغيرات بعض المواد الكميائية قبل وبعد التقلص

2) تحليل وإستنتاج

- نلاحظ في الضروف العادية تقلص العضلة مع استهلاك الكليكوجين وتكون الحمض اللبني ويفسر هذا بوجود أليات استقلابية طاقية حي هوائية في حالة وجود O_2، وحي لاهوائية عند نقص O_2 وتتمثل في التخمر اللبني، في حين استقرار كمية ATP والفوسفوكرياتين رغم استهلاكهما خلال التقلص العضلي وهذا يعني أنه يتم تجديدهما بالمسالك الإستقلابية المذكورة سابقا.

Stechoila.com

- في حالة كبح انحلال الكليكوز تتقلص العض لة بشكل عادي وتبقى كمية الكيلكوجين والحمض اللبني و ATP ثابتة مع استهلاك الفوسفوكرياتين الذي يستعمل كمصدر لتجديد الطاقة.

- عند كبح انحلال الكليكوز والفوسفوكرياتين تتقلص العضلة بإستعمال كمية ATP المتواجدة بالعضلة الى حين نفاذها فيتوقف التقلص بسبب غياب تجديد ATP.

3) طرق تجديد ATP

حسب سرعة تدخلها يمكن تصنيف الطرق المجددة لATP الى ثلاث أنواع:

أ- تفاعلات سريعة لا هوائية Anaérobie

هي مصدر الحرارة الأولية

التفاعل الأول: بواسطة التفاعل بين ADP تحت تأثير الأنزيم ميوكيناز MK (myokinase)

$2ADP \Rightarrow ATP + AMP$ المسؤول عن الحرارة الأولية

التفاعل الثاني: تحتوي الألياف العضلية على مركب غني بالطاقة يسمى الفوسفوكرياتين (CP)

$ADP + CP \Rightarrow ATP + C +$ حرارة أولية

ب- تفاعلات متوسطة لا هوائية Anaérobie

تتمثل في التخمر اللبني حيث تتم حلمأة الكليكوجين العضلي الى كليكوز وبعد انحلال الكليكوز يتم تحويل حمض البيروفيك الى حمض لبني حسب التفاعل

$C_6H_{12}O_6 + 2(ADP+Pi) \Rightarrow 2CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH + 2ATP$

يسبب تراكم الحمض اللبني انخفاض pH العضلة وبالتالي انخفاض فعالية الأنزيمات وانخفاض الإستقلاب العضلي من ما يؤدي الى التعب العضلي.

ج- تفاعلات بطيئة حي هوائية Aérobie

Stecholia.com

تتمثل في التنفس الخلوي حيث يتم حلمأة الكليكوجين العضلي الى كليكوز الذي يتم هدمه بشكل تام بوجود O_2 ليتحول الى CO_2 وH_2O مع انتاج كمية مهمة من الطاقة ATP .

هذا التفاعل مسؤول عن تحرير الحرارة المتأخرة

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \Rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38\ ATP + \text{حرارة متأخرة}$$

خلاصة

عند حصول مجهود عضلي قوي في مدة زمنية قصيرة (سباق 100 متر):

- يتم تجديد ATP بالترتيب التالي: كرياتين فوسفاط ثم التخمر ثم أخيرا التنفس؛

* في هذه الحالة يتميز الليف العضلي بقلة الميتوكندريات والشعيرات الدموية والخضاب الدموي وقابلية كبيرة لتعب بسبب التركيز الكبير للحمض اللبني، يهيمن هنا الإستقلاب الطاقي اللاهوائي.

عند حصول مجهود عضلي متواضع في مدة زمنية طويلة (كالمراطون أو سباق 5000 متر):

- يتم تجديد L'ATP بالترتيب التالي: التنفس ثم التخمر ثم الكرياتين فوسفاط في السرعة النهائية

* في هذه الحالة يتميز الليف العضلي بهيمنة الميتوكندريات والأوعية الدموية وقابلية ضعيفة للتعب وتوفره على خضاب دموي مهم، يهيمن هنا اذا الإستقلاب الطاقي الهوائي.

+ التطرق لحالة التصلب الجثثي

إن النجاح هو محصلة إجتهادات صغيرة تتراكم يوما بعد يوم

إنتهت الوحدة الأولى بحول الله وقوته

Stechoila.com